DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170433

殷志遥, 黄丽, 薛斌, 黄雅楠, 李小坤, 鲁剑巍. 稻-油轮作下保护性耕作对土壤肥力的影响及评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170433
Yin Z Y, Huang L, Xue B, Huang Y N, Li X K, Lu J W. Effect of conservation tillage on soil fertility under rice-rape rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170433

稻-油轮作下保护性耕作对土壤肥力的影响及评价*

殷志遥, 黄　丽**, 薛　斌, 黄雅楠, 李小坤, 鲁剑巍

(华中农业大学农业部长江中下游耕地保育重点实验室　武汉　430070)

摘　要: 本文选取湖北省武穴市、荆州市和武汉市3个稻-油轮作长期定位试验点(试验时间分别为9年、5年和3年), 通过连续监测土壤容重、孔隙度、pH、有机质、全氮、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾等, 研究在不同耕作年限和方式下, 秸秆还田和免耕对水稻季(2015年10月)和油菜季(2016年5月)各土层(0~20 cm和20~40 cm)中土壤物理性质和养分的影响, 并应用内梅罗指数法综合评价各土层土壤肥力水平, 以探讨长期秸秆还田对土壤肥力的影响。结果表明: 1)秸秆还田处理使水稻季和油菜季的土壤容重降低2.00%~16.54%, 土壤总孔隙度增加1.00%~15.07%; 而免耕处理下油菜季的变化与其相反, 水稻季的变化不显著。2)秸秆还田处理增加了3个试验点0~20 cm土层中有机质(4.76%~35.07%)、全氮(1.80%~32.03%)、速效磷(20.95%~65.82%)、碱解氮(5.97%~37.00%)和速效钾(8.71%~133.04%)的含量, 其中速效钾的增加幅度最高; 免耕处理对土壤各养分的影响不显著, 而在配施秸秆后, 相对于其他处理, 其对各养分的增加效果相对最好。各处理对20~40 cm土层的影响与0~20 cm土层的相似, 但整体增加效果没有后者显著。3)各试验处理中, 免耕+秸秆还田和施氮磷钾肥+秸秆还田两种处理增加各土层土壤综合肥力系数较大(7.56%~25.93%), 它们对土壤肥力的提高效果相对较好。

关键词: 稻-油轮作; 保护性耕作; 秸秆还田; 免耕; 土壤养分; 土壤综合肥力系数

中图分类号: S158　　**文献标识码:** A

Effect of conservation tillage on soil fertility under rice-rape rotation system*

YIN Zhiyao, HUANG Li**, XUE Bin, HUANG Yanan, LI Xiaokun, LU Jianwei

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this study, the long-term effects of straw return to soil and no-tillage on physical properties and nutrient content of soils were assessed by continuous monitoring of soil bulk density, porosity, pH, organic matter, total nitrogen, total potassium, available nitrogen, available phosphorus and available potassium. The study considered different soil layers (0–20 cm and 20–40 cm) under rice-rape rotation system in Wuxue, Jingzhou and Wuhan Cities in Hubei Province for various farming years (9, 5 and 3 years) and cultivation systems. Also the Nemoro index method was used to evaluate soil fertility in different soil layers. The aim of the study was to provide the scientific basis for application of conservation tillage measures and optimization of field management. Results showed that: 1) straw return to soil reduced soil bulk density by 2.00%–16.54% and increased total porosity by 1.00%–15.07% in rice and rape seasons. The changes in rape season were reversed under no-tillage treatment, while no significant changes were noted in the rice season. 2) Straw return to soil treatment increased the contents of organic matter (4.76%–35.07%), total nitrogen (1.80%–32.03%), available phosphorus (20.95%–65.82%), available nitrogen (5.97%–37.00%) and available potassium (8.71%–133.04%) in the 0–20 cm soil layer across the three sites. Compared with other nutrients, the greatest increase was recorded in available potassium. No significant differences were observed in no-tillage after straw returning, although it had the best effect in terms of increase in soil nutrients compared with the other treatments. The effect of each treatment on the 20–40 cm soil layer was similar to that on the 0–20 cm soil layer, but the total effect in terms of increase in the investigated parameters was not significant. 3) The no-tillage + straw return and the nitrogen, phosphorus, potassium + straw return treatments led to more increase in soil fertility with higher increase in integrated fertility index (7.56%–25.93%), they were good choice for improvement of soil fertility in the study sites.

* 公益性行业专项基金(201503123)和国家自然科学基金(41271252)资助
**通讯作者: 黄丽, 主要从事土壤化学和肥力方面的研究。E-mail: daisyh@mail.hzau.edu.cn
殷志遥, 主要从事土壤化学方面的研究。E-mail: 18271390486@163.com
收稿日期: 2017-05-10　接受日期: 2017-06-15
* This study was supported by the Public Welfare Industry Special Fund of China (201503123) and the National Natural Science Foundation of China (41271252).
**Corresponding author, E-mail: daisyh@mail.hzau.edu.cn
Received May 10, 2017; accepted Jun. 15, 2017

Keywords: Rice-rape rotation system; Conversation tillage; Straw return to soil; No-tillage; Soil nutrient; Integrated fertility index

土壤质量是土壤特性的综合反应，而土壤肥力是土壤质量的重要组成部分[1]，如何维持和提高土壤肥力状况是确保农业可持续发展的热点问题[2]。保护性耕作是目前发展可持续农业的主要技术之一，包括少免耕和地表覆盖等措施[3]。与传统耕作相比，保护性耕作能明显降低农业生产投入，对培肥地力，减少水土流失等有诸多贡献，已在国内外得到广泛应用[4]。因此，研究保护性耕作对土壤肥力的影响对于提高农田生产力、优化田间管理等具有重要意义。

研究表明，秸秆还田和施肥处理对提高土壤养分状况，改善土壤结构，增加作物产量等有重要影响[5]。而免耕能否维持和提高土壤肥力，不同研究者的结论各异。罗珠珠等[6]研究表明，免耕处理能一定程度上提高耕层土壤有机质、全氮和全磷含量，具有一定的土壤培肥作用。而徐阳春等[7-8]研究指出，相对于翻耕处理，免耕处理增加了0~5 cm土层有机碳、全氮、速效氮和速效钾的含量，而5~20 cm土层则与之相反；同时，免耕降低了0~20 cm土层的容重，增加了土壤孔隙度。而吴建富等[9]研究认为，随着免耕时间的增长，土壤物理性质会变差，且作物产量均有一定程度降低。

科学客观地评价土壤肥力水平对于土壤肥力提升的研究至关重要。曹承绵等[10]首先提出了将土壤肥力评价数值化的概念，其核心是以各土壤肥力指标作为评价的基础，通过计算各项指标对于肥力的贡献值来确定土壤的综合肥力状况。杨帆等[11]研究表明，相对于未秸秆还田，秸秆还田处理增加了土壤的综合肥力系数。也有研究表明，免耕处理能提高土壤表层的综合肥力状况，但在亚表层中的影响不明显[12]。而刘世平等[13]的研究认为，免耕处理后土壤的综合肥力系数有一定程度降低，但在配施秸秆后，其对土壤综合肥力的提高效果相对最好。在农业生产过程中常用pH、有机质和氮、磷、钾等养分来综合衡量土壤肥力的高低[14]。

近年来，我国开展了不少关于保护性耕作对土壤肥力影响的研究[15-16]。前人研究的结果中大多数包含了免耕和秸秆还田对土壤肥力的综合影响，往往不容易区分是免耕还是秸秆还田的效果；同时大多数的研究主要集中在某一区域的长期定位试验点上，缺少比较不同耕作年限以及环境条件下土壤肥力性质的变化，且耕作措施对土壤肥力影响的综合评价也较少。为此，本文选取湖北省武穴市、荆州市和武汉市3个水稻-油菜轮作(稻-油轮作)长期定位试验点，通过连续监测土壤的pH、有机质、全氮、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾7个指标来反映土壤综合肥力状况，并探讨秸秆还田和免耕对0~20 cm和20~40 cm土层土壤肥力的影响，为保护性耕作措施的研究和土壤培肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验土壤分别取自湖北省武穴市、荆州市和武汉市的稻-油轮作长期定位试验田。其中武穴长期定位试验点始于 2007 年，位于大金镇(29°59′21″N, 115°36′53″E)，其海拔 24 m，气候类型属于亚热带季风性湿润气候，年平均气温 16.9 ℃, 1985—2014 年间平均降雨量 1 489 mm，年蒸发量 1 361 mm。荆州长期定位试验点始于 2011 年，位于川店镇(30°35′28″N, 112°04′33″E)，海拔 80 m，属于亚热带季风气候，年平均气温 17.9 ℃, 年均降雨量 1 055 mm，年蒸发量 853 mm。武汉长期定位试验点始于 2013 年，位于华中农业大学校内试验基地(30°28′10″N, 114°21′21″E)。3 个试验点土壤均为第四纪沉积物发育的水稻土。供试土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 试验前各试验点土壤的基本性质

Table 1 Soil basic properties of the experiment sites at the beginning of the experiment

地点 Site	试验起始年份 Starting year of the experiment	pH	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Available nitrogen ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$)
武穴 Wuxue	2007	5.23	34.15	1.92	56.05	6.68	86.14
荆州 Jingzhou	2011	5.97	26.92	0.61	66.51	8.12	179.95
武汉 Wuhan	2013	7.04	5.01	0.03	—	1.26	123.44

—: 代表未测。 —: Represents no measurement.

武穴、荆州和武汉试验点各设 4 个处理, 3 次重复，共 6 个小区，小区面积 20 m², 随机区组排列。其中武穴试验点的 4 种耕作处理分别为传统耕作、传统耕作+秸秆还田、免耕以及免耕+秸秆还田，而荆州和武汉试验点的耕作处理均为传统耕作，其中传统耕作处理在每季作物种植之前对耕层土壤进行翻耕，而免耕

处理不翻耕。3 个试验点的具体施肥量见表 2。水稻和油菜收获后，秸秆还田处理的秸秆全部还田给下一季，未秸秆还田处理的秸秆全部拿走。试验于 2015 年 10 月水稻收获和 2016 年 5 月油菜季收获时用 S 型取样法分别取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土样，混匀风干并剔除石块以及植物根系后，过筛待测。

表2　不同试验点的田间试验处理描述

Table 2　Descriptions of different treatments of the field experiment in three sites

试验地点 Site	轮作制度 Rotation system	编号 Code	耕作处理 Tillage Treatment	施肥处理 Fertilization Treatment	每季作物施肥量 Fertilization amount of each crop (kg·hm^{-2})		
					N	P_2O_5	K_2O
武穴 Wuxue	水稻-水稻-油菜 Rice-rice-rape	CT	传统耕作 Conventional tillage	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	150/150/210	60/45/75	135/150/150
		CTS	传统耕作+秸秆还田 Conventional tillage + straw returning	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	150/150/210	60/45/75	135/150/150
		NT	免耕 No tillage	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	150/150/210	60/45/75	135/150/150
		NTS	免耕+秸秆还田 No tillage + straw returning	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	150/150/210	60/45/75	135/150/150
荆州 Jingzhou	水稻-油菜 Rice-rape	NP	传统耕作 Conventional tillage	氮磷 Nitrogen, phosphorus	180/180	60/60	0/0
		NPK	传统耕作 Conventional tillage	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	180/180	60/60	90/90
		NPS	传统耕作+秸秆还田 Conventional tillage + straw returning	氮磷 Nitrogen, phosphorus	180/180	60/60	0/0
		NPKS	传统耕作+秸秆还田 Conventional tillage + straw returning	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	180/180	60/60	90/90
武汉 Wuhan	水稻-油菜 Rice-rape	CK	传统耕作 Conventional tillage	不施肥 No fertilizer	0/0	0/0	0/0
		NPK	传统耕作 Conventional tillage	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	165/245	60/94	75/300
		S	传统耕作+秸秆还田 Conventional tillage + straw returning	不施肥 No fertilizer	0/0	0/0	0/0
		NPKS	传统耕作+秸秆还田 Conventional tillage + straw returning	氮磷钾 Nitrogen, phosphorus, potassium	165/245	60/94	75/300

“150/150/210”代表武穴地区早稻、晚稻和油菜季氮肥施用分别为 150 kg·hm^{-2}、150 kg·hm^{-2} 和 210 kg·hm^{-2}; “180/180”代表荆州地区中稻和油菜季氮肥施用分别为 180 kg·hm^{-2} 和 180 kg·hm^{-2}; “0/0”代表武汉地区中稻和油菜季氮肥分别是 0 kg·hm^{-2} 和 0 kg·hm^{-2}。“150/150/210” represents the application of nitrogen fertilizer for early rice, late rice and rape in the Wuxue site were 150, 150, 210 kg·hm^{-2} respectively; “180/180” represents the application of nitrogen fertilizer for middle-season rice and rape in the Jingzhou site were 180, 180 kg·hm^{-2} respectively; “0/0” represents the application of nitrogen fertilizer for middle-season rice and rape in the Wuhan site were 0, 0 kg·hm^{-2}, respectively, and so on.

1.2　测定项目及方法

土壤pH用电位法测定(水土比1∶2.5，奥立龙868型pH计)；土壤有机质(organic matter, OM)的测定用重铬酸钾容量法外加热法；全氮(total nitrogen, TN)用凯式法测定(K-9840自动定氮仪)；速效磷(available phosphorus, AP)用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提比色法测定(UV-1600紫外可见分光光度计)；碱解氮(available nitrogen, AN)用碱解扩散法测定；全钾(total potassium, TK)用高氯酸和硫酸浸提，速效钾(available potassium, AK)用1 mol·L^{-1}醋酸铵浸提，火焰光度法测定(HG-3火焰光度计)；土壤容重(bulk density, BD)用环刀法测定，并计算土壤总孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度[17]。

1.3　内梅罗指数法

目前关于土壤综合肥力评价的方法有很多，其中内梅罗指数法可以消除土壤各肥力指标之间量纲的差异，通过此方法算出的土壤分肥力系数处于0~3之间，使得相同的参数之间可比性较强，且同一级别的各属性之间分肥力系数比较接近，可比性较高，在国际上应用较普遍[14]。

(1)分肥力系数(IFI_i)的计算:

$$IFI_i=\begin{cases} x/x_a & x \le x_a \\ 1+(x-x_a)/(x_c-x_a) & x_a<x \le x_c \\ 2+(x-x_c)/(x_p-x_c) & x_c<x<x_p \\ 3 & x>x_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: IFI_i 为分肥力系数, x 为该属性测定值, x_a 与 x_p 为分级标准下、上限, x_c 为介于分级标准上、下限间。各属性值分级标准(x_a, x_c, x_p)主要参考第 2 次全国土壤普查标准(表 3), 每个等级反映了其各自的土壤肥力状况[18]。

表 3　土壤各属性的分级标准值

Table 3　Grading standards of soil properties

分级标准 Grade standard	pH	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	全钾 Total potassium ($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Available nitrogen ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$)
上限 Upper limit (x_a)	4.5	10	0.75	5	60	3	40
上下限间的值 Value between x_a and x_p (x_c)	6.5	20	1.5	20	120	10	100
下限 Lower limit (x_p)	8.5	30	2.0	25	180	20	150

(2)土壤综合肥力系数:

$$IFI=\sqrt{\frac{(IFI_{i\ 平均值})^2+(IFI_{i\ 最小值})^2}{2}}\times\left(\frac{n-1}{n}\right) \quad (2)$$

式中: IFI 为土壤综合肥力系数, $IFI_{i\ 平均值}$与 $IFI_{i\ 最小值}$为土壤各属性分肥力均值与最小值, n 为评价指标个数。

1.4　数据处理

用 Microsoft Excel 和 SPSS 进行数据处理及统计分析。

2　结果与分析

2.1　保护性耕作对土壤物理性质的影响

由表 4 可以看出, 相对于对照(CT、NP 和 CK)处理, 3 个试验点在秸秆还田处理后(CTS、NPS 和 S), 水稻季和油菜季的容重显著降低 4.24%~8.55%, 总孔隙度和毛管孔隙度显著升高 1.72%~12.46%。相对于 NT 和 NPK 处理, NTS 和 NPKS 处理的变化与其相似, 其中土壤容重显著降低 2.00%~16.54%, 总孔隙度显著升高 1.00%~15.07%, 而毛管孔隙度的变化规律不明显。土壤通气孔隙度在 3 个试验点秸秆还田处理下无明显变化。

NT 处理下水稻季的土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度均无显著变化。油菜季的土壤容重升高 1.00%, 总孔隙度降低 0.66%, 毛管孔隙度和通气孔隙度无明显变化。相对于 CTS 处理, NTS 处理下油菜季的土壤容重升高 7.61%, 总孔隙度和毛管孔隙度降低 3.87%和 6.19%, 通气孔隙度无显著变化。这与武均等[19]的研究结果相反, 可能是由于当外界对土壤扰动减小后, 土粒会发生沉积作用, 一定程度上引起了土壤板结[20]。

试验结果表明, 秸秆还田处理能降低土壤容重, 增加土壤总孔隙度和毛管孔隙度, 对土壤的物理性质起到一定的改良效果, 而免耕处理对于土壤物理性质的改良效果不明显。

表 4　不同试验点不同处理下土壤物理性质的变化

Table 4　Changes of soil physical properties under different treatments at different sites

试验点 Site	时间 Time	处理 Treatment	容重 Bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	通气孔隙度 Aeration porosity (%)
武穴 Wuxue	水稻季 Rice season	CT	0.93±0.09a	64.89±3.56a	59.40±2.18a	5.49±3.37a
		CTS	0.89±0.07a	66.26±2.81a	60.44±3.09a	5.82±3.70a
		NT	0.92±0.07a	65.30±2.59a	60.42±1.54a	4.88±2.87a
		NTS	0.86±0.09a	67.73±3.27a	59.27±2.66a	8.46±4.25a
	油菜季 Rape season	CT	1.00±0.08ab	62.39±2.80ab	57.90±1.49b	4.49±2.22a
		CTS	0.92±0.07b	65.11±2.55a	60.28±2.12a	4.83±2.45a
		NT	1.01±0.07a	61.98±1.05b	57.72±1.70b	4.26±1.28a
		NTS	0.99±0.08ab	62.59±3.05ab	56.55±1.89b	6.04±3.55a
荆州 Jingzhou	水稻季 Rice season	NP	1.17±0.09ab	55.96±3.27ab	51.24±2.37ab	4.72±3.34a
		NPK	1.24±0.13a	53.12±4.79b	49.54±1.56b	3.58±4.75a
		NPS	1.07±0.10b	59.66±3.94a	52.12±1.55a	7.54±3.75a

		NPKS	1.16±0.16ab	56.17±6.16ab	51.02±2.20ab	5.15±4.58a
	油菜季 Rape season	NP	1.18±0.13ab	55.55±4.86ab	47.09±0.19ab	8.46±5.18b
		NPK	1.27±0.11a	52.01±4.11b	47.98±0.13ab	4.03±5.23b
		NPS	1.13±0.10b	57.54±3.73a	49.33±2.68a	8.21±1.31b
		NPKS	1.06±0.05b	59.85±1.77a	45.54±1.11b	14.31±4.38a
武汉 Wuhan	水稻季 Rice season	CK	1.27±0.10a	51.91±3.80b	46.94±0.99b	4.97±3.23a
		NPK	1.30±0.05a	50.97±2.05b	46.40±1.36b	4.57±1.37a
		S	1.27±0.02a	52.06±0.70b	47.43±0.75b	4.63±1.06a
		NPKS	1.18±0.12b	55.61±4.63a	48.76±1.65a	6.85±3.48a
	油菜季 Rape season	CK	1.36±0.08b	48.66±2.96b	44.29±5.51b	4.37±2.76a
		NPK	1.40±0.10a	47.11±3.81ab	43.94±5.42b	3.17±2.59ab
		S	1.30±0.05b	50.84±1.43a	49.81±1.44a	1.03±0.31b
		NPKS	1.34±0.03ab	49.53±0.92ab	47.51±1.36b	2.02±0.44b

同列不同小写字母表示同一试验点同季不同处理间差异显著(P<0.05)。Different small letters in the same column mean significant differences at 0.05 level among different treatments in the same crop season in the same experiment site.

2.2 保护性耕作对土壤全量养分的影响

在 3 个试验点的供试土壤中，有机质、全氮及全钾(除荆州试验点)含量均表现为 0~20 cm 土层显著高于 20~40 cm 土层(表 5)。荆州试验点各处理的全钾含量分布表现不一致，可能是由于土壤中的根系、新鲜植物残体以及微生物中含有部分钾素，当其死亡后，在微生物的作用下发生腐解，使其所含养分释放至土壤中，又由于钾素在底层土壤中转移较慢，因此一定程度上造成了钾素在 20~40 cm 土层中的积累[21]。

在 0~20 cm 土层，相对于 CT、NP 和 CK 处理, CTS、NPS 和 S 处理整体上显著增加了 3 个试验点水稻季和油菜季的有机质(增幅为 4.76%~27.21%)和全氮(增幅为 3.55%~23.94%)含量。全钾含量在各试验点中表现出一定差异，其中 3 个试验点水稻季的全钾含量降低 4.44%~11.85%，而武穴和荆州试验点油菜季的分别升高 5.64%和 3.12%，武汉试验点降低 8.17%。可能是由于还田时间较短及各形态钾素间的转换差异造成。相对于 NT 和 NPK 处理，NTS 和 NPKS 处理对有机质、全氮和全钾的影响与上述相似，有机质、全氮和全钾含量分别增加 6.75%~35.07%、1.80%~32.03%和 10.12%~29.52%。

免耕处理对土壤全量养分的提升效果不明显。NT 处理显著降低水稻季和油菜季的有机质(降幅分别为 6.69%和 8.51%)、全钾(降幅分别为 7.94%和 15.05%)以及油菜季的全氮(降幅为 5.58%)含量。且相对于 CTS 处理，NTS 处理的有机质和全氮含量变化均不显著。可能与免耕处理下一定程度上造成土壤板结以及养分流失有关。

表 5　不同试验点各处理下不同土层土壤全量养分的变化

Table 5　Changes of soil total nutrients contents of different layers under different treatments at different sites

试验点 Site	时间 Time	处理 Treatment	有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)		全氮 Total nitrogen ($g \cdot kg^{-1}$)		全钾 Total potassium ($mg \cdot kg^{-1}$)	
			0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
武穴 Wuhan	水稻季 Rice season	CT	33.32±1.59Aa	8.70±1.59Bc	1.42±0.11Ab	0.81±0.03Ba	3.15±0.11Ab	2.71±0.06Bb
		CTS	34.24±2.31Aa	8.99±1.51Bbc	1.76±0.26Aa	0.74±0.07Bb	3.01±0.30Abc	2.59±0.10Bb
		NT	31.09±0.49Ab	9.52±1.11Bb	1.67±0.16Aab	0.74±0.10Bb	2.90±0.08Ac	2.86±0.37Aab
		NTS	37.10±2.75Aa	12.45±0.87Ba	1.70±0.25Aa	0.77±0.11Bb	3.53±0.19Aa	3.17±0.36Aa
	油菜季 Rape season	CT	35.50±3.60Aab	12.60±2.84Bb	1.97±0.17Aab	0.95±0.28Ba	3.19±0.20Ab	2.72±0.11Bbc
		CTS	37.19±4.59Aa	14.19±2.05Bab	2.04±0.20Aa	0.96±0.20Ba	3.37±0.07Aa	2.91±0.28Bb
		NT	32.48±2.18Ab	12.07±2.21Bb	1.86±0.19Ab	0.82±0.08Ba	2.71±0.17Ac	2.61±0.11Ac
		NTS	38.40±3.38Aa	18.03±1.14Ba	2.00±0.17Aab	0.86±0.05Ba	3.51±0.04Aa	3.04±0.14Ba
荆州 Jingzhou	水稻季 Rice season	NP	25.87±0.51Ac	11.02±0.73Bb	1.56±0.11Aa	0.65±0.05Bb	9.96±0.34Bb	11.57±0.53Aab
		NPK	26.23±0.87Ac	11.79±1.18Bb	1.28±0.08Ab	0.82±0.21Bb	10.64±0.22Ba	11.91±0.51Aa
		NPS	28.40±1.70Ab	13.79±0.95Ba	1.59±0.13Aa	0.69±0.05Bb	9.43±0.41Bc	10.54±0.72Ac
		NPKS	35.43±0.08Aa	13.74±1.90Ba	1.69±0.15Aa	0.76±0.18Bb	10.60±0.29Aa	11.04±0.54Abc
	油菜季 Rape season	NP	30.07±2.61Ac	18.02±0.80Bc	1.63±0.16Ab	1.00±0.06Bb	10.25±0.17Bc	11.05±0.24Aab
		NPK	31.41±0.47Ab	19.65±0.40Bb	1.70±0.08Aab	1.10±0.06Bab	10.91±0.22Ba	11.26±0.26Aa
		NPS	32.33±0.64Ab	20.60±1.39Bab	1.64±0.10Ab	1.21±0.20Ba	10.57±0.36Ab	10.84±0.32Ab
		NPKS	33.53±0.70Aa	21.00±1.6Ba	1.76±0.08Aa	1.22±0.21Ba	10.75±0.20Bab	11.28±0.14Aa
武汉 Wuhan	水稻季 Rice season	CK	8.19±0.83Ab	6.00±0.53Bb	0.58±0.04Aa	0.54±0.08Aa	10.97±0.54Ab	10.37±0.44Ab
		NPK	10.12±1.25Aa	7.42±1.85Ba	0.61±0.09Aa	0.58±0.03Aa	10.33±0.66Ac	9.45±0.28Bc
		S	10.18±1.73Aa	6.50±0.56Bab	0.59±0.03Aa	0.50±0.05Ba	9.67±0.27Ad	10.15±0.90Abc

	NPKS	10.33±0.19Aa	5.59±0.72Bb	0.56±0.06Aa	0.35±0.04Bb	11.72±0.24Aa	11.22±0.73Aa
油菜季 Rape season	CK	7.79±0.82Ab	4.76±1.09Ba	0.56±0.05Ab	0.46±0.11Ba	11.02±0.25Ab	10.43±0.26Bb
	NPK	9.88±1.95Aa	6.03±1.68Ba	0.57±0.03Ab	0.45±0.04Ba	10.47±0.25Ac	9.58±0.34Bc
	S	9.91±1.18Aa	5.67±1.21Ba	0.59±0.03Aab	0.43±0.04Ba	10.12±0.35Ad	9.93±0.42Ac
	NPKS	10.21±2.46Aa	6.23±2.08Ba	0.63±0.09Aa	0.47±0.12Ba	11.53±0.26Aa	11.10±0.30Ba

同行不同大写字母表示同一处理同一指标不同层次间差异显著(P<0.05), 同列不同小写字母表示同一层次相同试验地点相同作物季不同处理间差异显著(P<0.05)。Different capital letters in the same line mean significant differences at 0.05 level among different soil layers for the index under the same treatment, different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level among different treatments in the same layer and the same crop season in the same experiment site.

在 20~40 cm 土层, 各处理对水稻季和油菜季土壤有机质含量均有一定程度提升作用(增幅为3.33%~43.10%)。而全氮和全钾含量变化规律不明显。

试验结果表明, 秸秆还田处理能一定程度上增加 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的有机质和全氮含量(0~20 cm 土层的增加效果好于 20~40 cm 土层), 而全钾的变化规律不明显。免耕处理对有机质、全氮和全钾的影响在各土层中表现不一致。

2.3 保护性耕作对土壤 pH 和速效养分的影响

武穴试验点的 pH 为 4.81~5.91, 荆州试验点为 5.93~6.76, 武汉试验点为 6.24~6.72, 表现为酸性或中性偏酸性(图 1)。在各土层中, 土壤 pH 基本表现为 0~20 cm 土层显著低于 20~40 cm 土层。相对于 CT、NP 及 CK 处理, NTS 和 NPKS 处理均能一定程度上降低 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤的 pH, 其中在武穴试验点均达到显著差异, 而武汉和荆州试验点在不同土层中的表现不一致(武汉试验点在 0~20 cm 土层, 荆州试验点在 20~40 cm 土层的差异均显著)。试验结果表明, 秸秆还田和免耕一定程度上降低了土壤 pH, 这与孟红旗等[22]的研究结果相似。

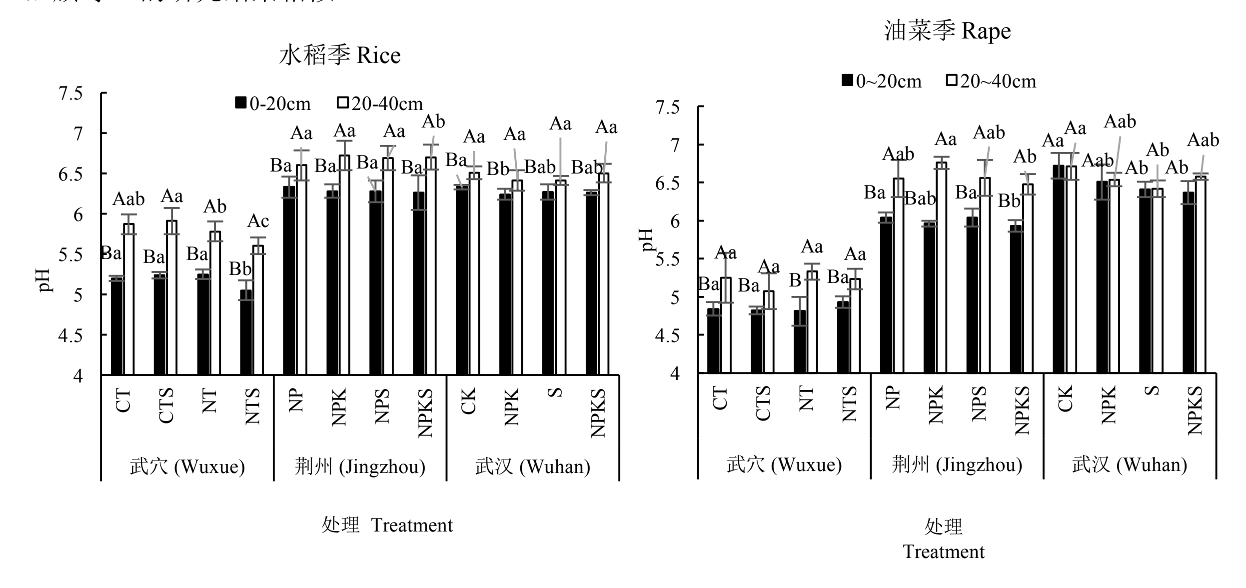


图 1　不同试验点各处理下不同土层土壤 pH 的变化

Fig. 1　Changes of soil pH of different layers under different treatments at different sites

不同大写字母表示同一处理同一指标不同层次间差异显著(P<0.05), 不同小写字母表示同一层次相同试验地点相同作物季不同处理间差异显著(P<0.05)。Different capital letters mean significant differences at 0.05 level among different soil layers for the index under the same treatment, different lowercase letters mean significant differences at 0.05 level among different treatments in the same layer and the same crop season in the same experiment site.

由表 6 可知, 在武穴和武汉试验点, 土壤速效磷、碱解氮和速效钾含量均表现为 0~20 cm 土层显著高于 20~40 cm 土层, 荆州试验点的速效钾含量在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的含量变化不一致, 速效磷和碱解氮含量的表现规律与武穴和武汉试验点相似。

在 0~20 cm 土层, 相对于 CT、NP 和 CK 处理, CTS、NPS 和 S 处理显著增加了 3 个试验点水稻季和油菜季的碱解氮(增幅为5.97%~33.93%)和速效钾(增幅为8.71%~121.49%)含量, 速效磷含量在3个试验点也有一定程度的增加, 其中荆州试验点水稻季和武汉试验点的增加效果显著(增幅为 20.95%~65.82%)。且相对于NT 和 NPK 处理, NTS 和 NPKS 处理后碱解氮和速效钾含量分别增加 9.05%~37.00%和 11.35%~133.04%, 速效磷含量在武穴和荆州试验点显著增加 27.25%~39.81%, 而武汉试验点整体变化不明显。

免耕处理对速效养分的影响与秸秆还田处理不同。相对于 CT 处理, NT 处理下碱解氮、速效磷以及速效钾的含量变化均不显著。而相对于 CTS 处理, NTS 处理显著增加了武穴试验点水稻季和油菜季的速效磷含量(增幅分别为 14.90%和 17.78%), 水稻季的碱解氮含量也显著增长 31.38%, 速效钾以及油菜季的碱解氮含量无明显变化。整体上而言, 相对于秸秆还田处理, 免耕对土壤速效养分的增加效果相对较小。

在 20~40 cm 土层, 秸秆还田整体上能提高 3 个试验点的碱解氮(11.15%~50.64%)、速效磷(25.30%~150.00%)和速效钾(10.81%~233.93%)含量, 但增加效果没有 0~20 cm 土层的显著, 这与 Zhang 等[23]的研究结果相似。免耕处理下各速效养分的含量整体上无明显变化。

由上可知, 秸秆还田处理一定程度上增加了 0~20 cm 和 20~40 cm 土层各速效养分含量(0~20 cm 土层的增加效果好于 20~40 cm 土层), 其中速效钾的增加幅度相对较高。而免耕处理的影响不显著。

表 6　不同试验点各处理下不同土层土壤速效养分的变化

Table 6　Changes of soil available nutrients contents of different layers under different treatments at different sites　　mg·kg-1

试验点 Site	时间 Time	处理 Treatment	速效磷 Available phosphorus		碱解氮 Available nitrogen		速效钾 Available potassium	
			0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
武穴 Wuxue	水稻季 Rice season	CT	27.05±3.86Ab	7.98±6.27Ba	116.34±1.78Ac	34.02±1.46Bc	30.25±1.26Ab	21.67±1.03Bc
		CTS	30.48±3.84Ab	11.91±5.06Ba	123.29±7.84Ab	32.79±1.21Bc	67.00±5.29Aa	32.00±0.82Bb
		NT	27.52±4.98Ab	9.83±3.99Ba	118.23±3.35Abc	38.87±0.37Bb	31.50±2.08Ab	14.00±2.28Bd
		NTS	35.02±1.36Aa	12.36±2.54Ba	161.98±3.35Aa	44.52±1.08Ba	67.75±1.26Aa	46.75±2.87Ba
	油菜季 Rape season	CT	28.51±7.29Ab	7.80±1.88Bb	138.69±3.27Ab	66.98±5.88Ba	49.20±4.71Ab	19.79±1.55Bab
		CTS	30.32±4.58Ab	12.54±2.24Ba	161.02±8.95Aa	63.70±0.48Ba	86.53±1.59Aa	34.02±3.87Ba
		NT	25.90±1.38Ab	5.84±0.82Bb	137.38±2.64Ab	64.26±2.52Ba	44.46±4.44Ab	18.20±3.12Bb
		NTS	35.71±3.35Aa	7.27±2.94Bb	161.20±3.98Aa	67.22±1.06Ba	103.61±4.29Aa	32.75±5.42Ba
荆州 Jingzhou	水稻季 Rice season	NP	7.01±0.55Ac	5.93±0.53Bc	102.81±0.51Ad	39.50±1.80Bd	66.00±2.24Bc	78.00±6.87Aa
		NPK	8.54±0.58Ab	6.53±0.81Bc	123.00±0.66Ab	44.12±0.75Bc	67.67±0.52Bc	78.50±2.35Aa
		NPS	8.68±0.87Ab	7.43±0.68Bb	120.80±1.47Ac	51.77±0.36Bb	71.75±3.44Bb	77.50±5.92Aa
		NPKS	11.94±0.56Aa	8.36±0.71Ba	149.56±0.70Aa	62.27±0.59Ba	100.25±1.26Aa	76.17±1.47Ba
	油菜季 Rape season	NP	9.71±0.92Ab	8.05±0.65Ba	112.37±2.19Ac	67.43±2.40Bb	88.83±2.41Ad	91.48±1.41Aa
		NPK	10.73±1.28Ab	8.25±0.91Ba	113.73±5.90Ac	79.31±7.07Ba	101.75±4.94Ac	84.18±2.41Bb
		NPS	10.69±1.21Ab	8.11±2.65Ba	126.92±2.76Ab	74.95±4.93Ba	109.71±1.96Ab	85.51±2.52Bb
		NPKS	14.13±2.62Aa	8.15±0.84Ba	151.48±3.60Aa	75.20±4.84Ba	120.32±3.93Aa	86.84±2.41Bb
武汉 Wuhan	水稻季 Rice season	CK	1.05±0.41Ab	0.49±0.39Bb	31.69±0.45Ac	19.67±0.93Ba	95.25±4.92Ac	64.25±4.92Bd
		NPK	1.53±0.47Aa	1.02±0.17Ba	34.79±1.13Ab	19.86±0.96Ba	105.75±7.80Ab	74.00±4.55Bb
		S	1.27±0.24Aab	1.00±0.26Ba	35.47±0.21Ab	21.48±0.21Ba	106.75±1.71Ab	69.25±1.50Bc
		NPKS	1.65±0.43Aa	1.00±0.38Ba	37.94±0.83Aa	20.23±4.54Ba	117.75±0.96Aa	82.00±6.93Ba
	油菜季 Rape season	CK	2.75±2.06Ab	0.64±0.68Bb	34.16±0.33Ac	21.19±1.08Bc	98.13±5.91Ab	77.21±9.32Ba
		NPK	4.47±1.55Aa	1.24±2.03Bab	45.24±2.44Ab	29.66±2.44Bb	102.78±9.82Ab	80.53±3.66Ba
		S	4.56±1.35Aa	1.60±0.83Ba	45.75±0.65Ab	31.92±2.60Bb	128.35±5.11Aa	80.20±9.09Ba
		NPKS	4.82±0.46Aa	1.75±1.65Ba	54.46±1.83Aa	40.15±2.28Ba	135.65±6.48Aa	82.85±12.26Ba

同行不同大写字母表示同一处理同一指标不同层次间差异显著(P<0.05), 同列不同小写字母表示同一层次相同试验地点相同作物季不同处理间差异显著(P<0.05)。Different capital letters in the same line mean significant differences at 0.05 level among different soil layers for the index under the same treatment, different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level among different treatments in the same layer and the same crop season in the same experiment site.

2.4　保护性耕作对土壤综合肥力系数的影响

用内梅罗指数法对土壤养分进行综合分析(表 7), 结果表明 3 个试验点的土壤综合肥力系数(IFI)均表现为油菜季高于水稻季, 0~20 cm 土层显著高于 20~40 cm 土层。

在 3 个试验点的供试土壤中, 相对于 CT、NP 及 CK 处理, CTS、NPS 和 S 处理均增加了 3 个试验点各土层的 IFI 值(增幅为 3.68%~17.28%), 且相对于 NT 和 NPK 处理, NTS 和 NPKS 处理的 IFI 值也增加了 6.49%~27.69%(0~20 cm 土层增加更为明显)。

免耕表现与秸秆还田处理有一定的差别, 其中相对于 CT 处理, NT 处理下的土壤 IFI 值在水稻季 0~20 cm 和 20~40 cm 土层变化不明显, 油菜季显著降低 3.10%和 6.76%。相对于 CTS 处理, NTS 处理显著增加了水稻季 20~40 cm 土层以及油菜季 0~20 cm 土层的 IFI 值(增幅分别为 13.70%和 2.90%)。

研究结果表明, 秸秆还田能有效提高各土层的土壤综合肥力状况, NT 处理对土壤综合肥力状况的提高效果不明显, 但 NTS 处理则有较好的提高效果。在各处理中, 相对于对照(CT、NP 和 CK), NTS 和 NPKS

处理对土壤肥力的提高效果相对较好(增幅为 7.56%~25.93%)。

表 7　不同试验点各处理下不同土层土壤综合肥力系数(IFI)的变化

Table 7　Changes of soil integrated fertility indexes of different layers under different treatments at different sites

试验点 Site	处理 Treatment	水稻季 Rice		油菜季 Rape	
		0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
武穴 Wuxue	CT	1.15±0.01Ab	0.69±0.02Bb	1.29±0.01Ac	0.74±0.07Bab
	CTS	1.27±0.04Aa	0.73±0.03Bb	1.38±0.01Ab	0.83±0.08Ba
	NT	1.18±0.03Ab	0.65±0.03Bb	1.25±0.02Ad	0.69±0.04Bb
	NTS	1.33±0.05Aa	0.83±0.02Ba	1.42±0.01Aa	0.82±0.02Ba
荆州 Jingzhou	NP	1.36±0.03Ac	0.89±0.02Bd	1.47±0.02Ac	1.19±0.03Bb
	NPK	1.40±0.02Abc	0.95±0.03Bc	1.51±0.01Ab	1.30±0.06Ba
	NPS	1.41±0.02Ab	1.00±0.02Bb	1.53±0.02Ab	1.27±0.02Ba
	NPKS	1.57±0.02Aa	1.08±0.01Ba	1.61±0.04Aa	1.28±0.03Ba
武汉 Wuhan	CK	0.70±0.04Ab	0.58±0.04Ba	0.81±0.02Ac	0.60±0.06Bb
	NPK	0.77±0.08Aab	0.64±0.01Ba	0.91±0.01Ab	0.66±0.03Bba
	S	0.75±0.02Aab	0.62±0.04Ba	0.95±0.02Ab	0.70±0.02Bba
	NPKS	0.82±0.05Aa	0.62±0.02Ba	1.02±0.05Aa	0.75±0.09Ba

同行不同大写字母表示同一处理同一指标不同层次间差异显著(P<0.05)，同列不同小写字母表示同一层次相同试验地点相同作物季不同处理间差异显著(P<0.05)。Different capital letters in the same line mean significant differences at 0.05 level among different soil layers for the index under the same treatment, different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level among different treatments in the same layer and the same crop season in the same experiment site.

3　讨论

供试秸秆还田处理均能一定程度上增加 0~20 cm 土层中各养分含量，其中速效钾的增加幅度相对最高。可能是因为水稻和油菜中的钾素主要分布在叶和秸秆，秸秆中钾相对含量一定程度上高于其中的氮和磷[24]。秸秆还田后在微生物的作用下发生腐解，将其中部分有机质、氮、磷、钾等营养元素归还到土壤中，一定程度上增加了土壤中各养分含量。且秸秆中的钾素主要以离子态存在，易被溶解出来，补充速效钾中各组分(水溶性钾，交换性钾)的含量；秸秆在腐解过程中还会释放有机酸、阴离子和碱性金属等，进一步促进矿物钾的释放和转化[25-26]。因此，秸秆还田对速效钾的影响在各养分中相对最好。另外，秸秆腐解产生的有机酸也会促进难溶性磷向可溶性磷转化[27]，间接提高了土壤磷的有效性。土壤中的氮素主要以有机氮的形式存在，秸秆加入后，激发了异养微生物对添加物质的分解，从而使氮的有效性升高[28-29]。而秸秆还田处理对各土层中养分的增加效果表现为 0~20 cm 土层优于 20~40 cm 土层，这与慕平等[30]的研究结果相似。可能是由于秸秆还田和施肥处理中养分的输入多集中在土壤表层，容易导致其在土壤表层中的高度富集，从而造成 0~20 cm 土层中的增加效果相对更好[31]。

本研究中，NT 处理对土壤肥力水平的影响不明显，且在水稻季和油菜季之间表现出一定的差异。一方面可能是由于免耕处理改变了土壤物理性质，进而影响了其他的土壤性状。在本研究中，NT 处理增加了油菜季的土壤容重(增加 1.00%)，降低了土壤总孔隙度(降低 0.66%)，而水稻季的变化不显著，这与薛斌等[32]的研究结果相似。研究表明，土壤的物理性质是影响土壤结构、通气和保水保肥等性能的关键因素[33]。随着容重的增大，土壤流失量会增多，从而造成部分养分的流失[34]。另一方面，土壤酶对作物轮作以及不同耕作方式等的响应比较敏感[6]，环境的影响可能会使土壤酶的活性表现出差异。这些都可能造成 NT 处理对土壤肥力水平影响结果不一致。相比之下，NTS 和 NPKS 对土壤肥力的提升效果相对较好，可能是因为增施秸秆后，有利于土壤动物和微生物的生长繁殖，疏松土壤，降低土壤容重[20]。同时秸秆对土温变化有一定的调节作用，有利于土壤养分的转化[35]。因此，农业生产中，在免耕或施肥的基础上配合秸秆还田对于维持和提高土壤肥力具有积极作用。

4　结论

1)秸秆还田处理能降低土壤容重，增加土壤总孔隙度，对土壤物理性质有一定的改良作用。同时能一定程度上增加 0~20 cm 土层中土壤养分含量，其中速效钾的增加幅度相对最高。

2)NT 处理对土壤物理性质的影响在稻-油轮作制度下表现出一定的差异，且对土壤养分的影响不明显，而 NTS 处理对土壤养分含量则有较好的提高效果。

3)相对于对照处理，秸秆还田处理能提高土壤综合肥力水平(0~20 cm 土层的肥力状况显著优于 20~40

cm 土层)，其中 NTS 和 NPKS 处理增加效果相对较好(7.56%~25.93%)。而 NT 处理对土壤肥力的提升效果不明显。

参考文献 References

[1] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤肥力现状分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 190–196
Ma Q H, Zhang G H, Geng R, et al. Present condition analysis of sloping farmland soil fertility in the water erosion zone of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 190–196

[2] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1530–1540
Wang S L, Wang H, Li J, et al. Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1530–1540

[3] 冯福学, 黄高宝, 于爱忠, 等. 不同保护性耕作措施对武威绿洲灌区冬小麦水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1060–1065
Feng F X, Huang G B, Yu A Z, et al. Effects of different conservation tillage measures on winter wheat water use in Wuwei oasis irrigated area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1060–1065

[4] Peng W D, Chu C X, Zhong Y Q, et al. Effect of sweet corn straw returning to the field on soil fertility, yield and benefit[J]. Meteorological and Environmental Research, 2016, 7(4): 59–63

[5] 张仁陟, 黄高宝, 蔡立群, 等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 61–69
Zhang R Z, Huang G B, Cai L Q, et al. Dry farmland practice involving multi-conservation tillage measures in the loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 61–69

[6] 罗珠珠, 黄高宝, Li G D, 等. 保护性耕作对旱作农田耕层土壤肥力及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1085–1092
Luo Z Z, Huang G B, Li G D, et al. Effects of conservation tillage on soil nutrients and enzyme activities in rainfed area[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1085–1092

[7] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 549–552
Xu Y C, Shen Q R, Lei B K, et al. Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 549–552

[8] 冯跃华, 邹应斌, 王淑红, 等. 免耕对土壤理化性状和直播稻生长及产量形成的影响[J]. 作物研究, 2004, 18(3): 137–140
Feng Y H, Zou Y B, Wang S H, et al. Impact of zero tillage on the soil characters and the growth and yield formation in direct seeding rice[J]. Crop Research, 2004, 18(3): 137–140

[9] 吴建富, 潘晓华, 王璐, 等. 双季抛栽条件下连续免耕对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3159–3167
Wu J F, Pan X H, Wang L, et al. Effects of continuous no-tillage on crop yield and soil fertility in double rice cropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(15): 3159–3167

[10] 曹承绵, 严长生, 张志明, 等. 关于土壤肥力数值化综合评价的探讨[J]. 土壤通报, 1983, (4): 13–15
Cao C M, Yan C S, Zhang Z M, et al. Discussion on the comprehensive evaluation of soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1983, (4): 13–15

[11] 杨帆, 董燕, 徐明岗, 等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3040–3044
Yang F, Dong Y, Xu M G, et al. Effects of straw returning on the integrated soil fertility and crop yield in southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3040–3044

[12] 江泽普, 黄绍民, 韦广泼, 等. 不同连作免耕稻田土壤肥力变化与综合评价[J]. 西南农业学报, 2007, 20(6): 1250–1254
Jiang Z P, Huang S M, Wei G P, et al. Comprehensive evaluation and changes of paddy soil fertility under different continuous cropping and no-tillage modes[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2007, 20(6): 1250–1254

[13] 刘世平, 陈后庆, 聂新涛, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田土壤肥力的综合评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 51–56
Liu S P, Chen H Q, Nie X T, et al. Comprehensive evaluation of tillage and straw returning on soil fertility in a wheat-rice double cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 51–56

[14] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197–4204
Bao Y X, Xu M G, Lü F T, et al. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica,

2012, 45(20): 4197–4204

[15] 姜学兵, 李运生, 欧阳竹, 等. 免耕对土壤团聚体特征以及有机碳储量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 270–278

Jiang X B, Li Y S, Ouyang Z, et al. Effect of no-tillage on soil aggregate and organic carbon storage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 270–278

[16] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 276–284

Wu J, Cai L Q, Qi P, et al. Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the loess plateau of central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 276–284

[17] 张宝峰, 曾路生, 李俊良, 等. 优化施肥处理下设施菜地土壤容重与孔隙度的变化[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 309–314

Zhang B F, Zeng L S, Li J L, et al. Soil bulk density and porosity in greenhouse vegetables field under the optimized fertilization treatment[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(32): 309–314

[18] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 245–247

Kan W J, Wu Q T. A quantitative method of comprehensive evaluation of soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(6): 245–247

[19] 武均, 蔡立群, 罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 112–117

Wu J, Cai L Q, Luo Z Z, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties of rainfed field of the loess plateau in central of Gansu[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 112–117

[20] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 439–444

Chen X W, Zhang X P, Liang A Z, et al. Effects of tillage mode on black soil’s penetration resistance and bulk density[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 439–444

[21] 张婧, 张仁陟, 左小安. 保护性耕作对黄土高原农田土壤理化性质的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 137–143

Zhang J, Zhang R Z, Zuo X A. Effects of conservative tillage on physical and chemical characteristics under a pea-wheat rotation system in the loess plateau[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 137–143

[22] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的pH演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109–1116

Meng H Q, Liu J, Xu M G, et al. Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 1109–1116

[23] Zhang P, Chen X L, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 65–72

[24] 路兴花, 吴良欢, 庞林江, 等. 连续覆膜旱作稻氮、磷、钾养分分布特征探讨[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 145–149

Lu X H, Wu L H, Pang L J, et al. Distribution of N, P and K in rice plant under a long-term located plastic film mulching cultivation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(1): 145–149

[25] Mengel K, Uhlenbecker K. Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3): 761–766

[26] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(3): 341–349

[27] 杨昆仑, 杨守军, 辛秀琛. 玉米秸秆还田对土壤中磷有效性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(28): 13782–13783

Yang K L, Yang S J, Xin X C. Effect of maize straw returning to soil on phosphorus availability[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(28): 13782–13783

[28] Kaewpradit W, Toomsan B, Cadisch G, et al. Mixing groundnut residues and rice straw to improve rice yield and N use efficiency[J]. Field Crops Research, 2009, 110(2): 130–138

[29] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535

Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 526–535

[30] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 81–85

Mu P, Zhang E H, Wang H N, et al. Effects of continuous returning straw to maize tilth soil on chemical character and microbial biomass[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 81–85

[31] 姚小萌, 周正朝, 田霄鸿, 等. 长期机械化秸秆全量还田对土壤养分分层的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 198–202
Yao X M, Zhou Z C, Tian X H, et al. Effects of long-term all straw return to field with machine on the stratifications of soil nutrients[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1): 198–202
[32] 薛斌, 殷志遥, 肖琼, 等. 稻-油轮作条件下长期秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(7): 134–141
Xue B, Yin Z Y, Xiao Q, et al. Effects of long-term straw returning on soil fertility under rice rape rotation system[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(7): 134–141
[33] Page K, Dang Y, Dalal R. Impacts of conservation tillage on soil quality, including soil-borne crop diseases, with a focus on semi-arid grain cropping systems[J]. Australasian Plant Pathology, 2013, 42(3): 363–377
[34] 沈奕彤, 郭成久, 金珊, 等. 土壤容重对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 26–30
Shen Y T, Guo C J, Jin S, et al. Effect of soil bulk density on nutrient loss of black soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 26–30
[35] 杨招弟, 蔡立群, 张仁陟, 等. 不同耕作方式对旱地土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 514–517
Yang Z D, Cai L Q, Zhang R Z, et al. Soil enzymatic activities under different tillages practricess in dryland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(3): 514–517